

**ANIPB2008 - Aplicação de novos materiais e de modelos de análise não linear material no desenvolvimento de sistemas estruturais pré-fabricados para edifícios industriais**

**João Paulo Dias**

Licenciado em  
Engenharia Civil

Civitest

Braga/Portugal

**Lúcio Lourenço**

Mestre em  
Engenharia Civil

Civitest

Braga/Portugal

**Joaquim Barros**

Prof. Associado c/  
Agregação

Universidade do  
Minho

Guimarães/Portugal

**Francisco Oliveira**

Mestre em  
Engenharia Civil

Maprel

Portugal

## **SUMÁRIO**

No presente trabalho é descrita a investigação efectuada no âmbito do dimensionamento de viga pré-fabricada para vencer vãos de 20 m de coberturas de edifícios industriais, denominada VMC20. Para tal utilizou-se betão reforçado com fibras de aço e recorreu-se a métodos avançados de análise de estruturas.

**Palavras-chave:** Pré-esforço, BRFA, MEF, Análise não linear, Vigas pré-fabricadas

## **1. INTRODUÇÃO**

O surgimento de novos materiais e o contínuo desenvolvimento de ferramentas numéricas que permitem explorar os benefícios derivados das propriedades desses materiais, colocam novos desafios na Indústria da Construção Civil, em especial na que se centra na concepção, desenvolvimento e aplicação de elementos pré-fabricados de betão armado. A utilização de betão reforçado com fibras, por um lado, e a análise não linear material de estruturas, por outro, por recurso a programas de cálculo automático baseados no método dos elementos finitos, foram explorados neste trabalho, no sentido de ser possível inovar no sector da pré-fabricação.

Dada a elevada percentagem de armadura convencional utilizada no reforço da maioria dos elementos pré-fabricados, nomeadamente, armadura para reforço ao esforço de corte, os encargos associados ao material e à mão-de-obra dispendida na sua montagem representam um peso significativo no custo de fabrico dos elementos pré-fabricados. Se esta armadura de reforço, ou uma percentagem significativa, puder ser substituída por fibras discretas de aço, o processo de pré-fabricação é simplificado. Além disso, dada a distribuição tridimensional das fibras no seio do betão, a sua eficácia em termos de contribuição para a resistência, quer aos esforços de corte, como de tensões de tracção advindas de acções não controláveis (nomeadamente no processo de fabrico, transporte e aplicação) pode ser superior à garantida pela armadura convencional.

A utilização de ferramentas de cálculo sofisticadas, como o método dos elementos finitos (MEF) [1-2], permite efectuar dimensionamentos mais rigorosos e detalhados de elementos pré-fabricados, nomeadamente os reforçados com armadura convencional, armadura de pré-esforço e fibras de aço. No entanto, para que este seja válido, é necessário que as leis constitutivas usadas na modelação do comportamento dos materiais reproduzam, com suficiente rigor, o comportamento registado em ensaios experimentais.

## 2. PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS

A VMC20 apresenta espessura,  $e$ , variável entre os banzos e a alma (ver Figura 1). Salienta-se a inclusão de aligeiramentos na zona central do banzo que permitem, para além da redução do volume de betão, com a consequente redução do peso próprio da estrutura, a passagem de infra-estruturas de águas, esgotos, climatização e/ou electricidade através dessas aberturas, evitando a redução do pé direito útil dos compartimentos interiores.

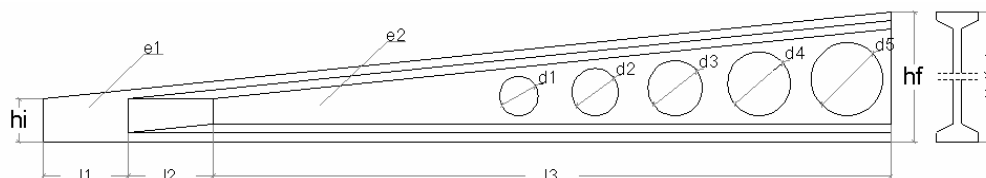


Figura 1 – Secção longitudinal e transversal da “VMC20”.

## 3. MATERIAIS

A VMC20 é constituída por Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA), com as propriedades apresentadas no Quadro 1 (classe de resistência C50/60). As propriedades de fractura do BRFA apresentadas foram definidas com base em resultados obtidos no âmbito de investigação experimental com BRFA [3]. No Quadro 1,  $E$  representa o módulo de elasticidade em compressão do betão, enquanto  $f_{ck}$  e  $f_{ctk,min}$  são o valor característico de resistência do betão à compressão e característico mínimo da resistência do betão à tracção, segundo o Código Modelo CEB-FIP 1993 [4]. As restantes variáveis definem o processo de abertura de

fissura no quadro do modelo de fendilhação distribuída implementado no programa de cálculo FEMIX V4.0, utilizado nas análises efectuadas no presente trabalho [5] (ver Figura 2).

Quadro 1 - Propriedades mecânicas do BRFA adoptado.

$t$	$E$ (GPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ctk,min}$ (MPa)	$G_F$ (Nmm/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_{n,2}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$	$\sigma_{n,2}^{cr} / \sigma_{n,1}^{cr}$	$\varepsilon_{n,3}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$	$\sigma_{n,3}^{cr} / \sigma_{n,1}^{cr}$
24horas	28.6	21.2	1.50	2.0	0.05	0.60	0.20	0.20
28dias	39.0	50.0	2.90	4.0	0.05	0.60	0.20	0.20

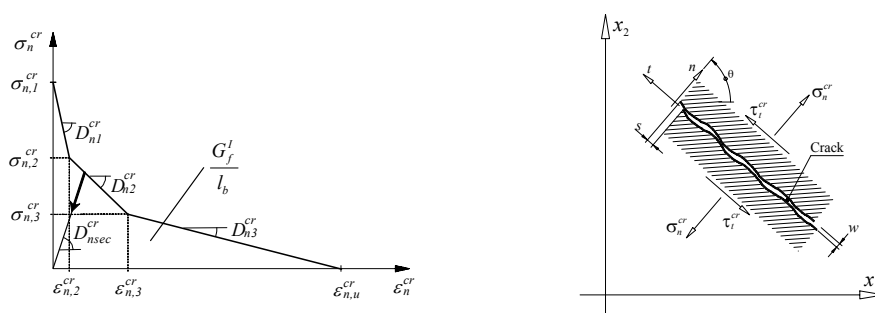


Figura 2 - Diagrama que modela a propagação de abertura de fenda.

Admite-se a aplicação de pré-tensão no banzo inferior da VMC20. As propriedades mecânicas consideradas dos aços utilizados estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.

Aço para Pré-tensão		A500NR	
$E_p$	$f_{puk}$	$E_s$	$f_y$
(GPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)
200	1860	200	500

#### 4. ACÇÕES CONSIDERADAS

Para o dimensionamento do elemento estrutural proposto consideraram-se as acções apresentadas no Quadro 3. A quantificação das mesmas foi realizada de acordo com a regulamentação vigente [6-7].

Quadro 3 – Acções consideradas.

Acções Permanentes	Acções Variáveis
Peso Próprio do elemento estrutural	Sobrecarga
Chapa de cobertura e ligações metálicas	Neve
Instalações	Sismo [8]
Madres	

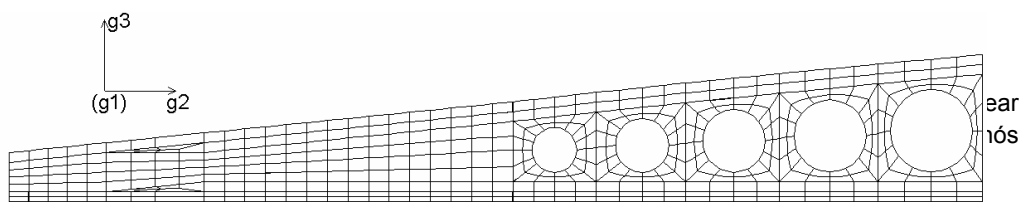


Figura 3).

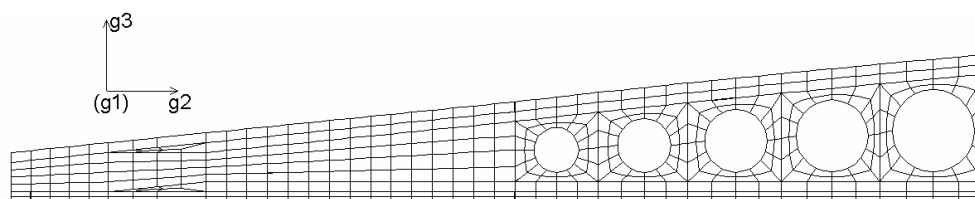


Figura 3 – Malha de elementos finitos adoptada.

## 6. CASOS DE CARGA CONSIDERADOS

O dimensionamento da *VMC20* foi efectuado recorrendo a três condições de carregamento:

- Fabrico (Peso próprio + Pré-tensão), admitindo as propriedades mecânicas dos materiais às 24 horas;
- Serviço (Peso próprio + Pré-tensão + Sobrecarga), admitindo as propriedades mecânicas dos materiais aos 28 dias;
- Estados Limites Últimos.

### 6.1. Fabrico

Na fase de instalação, poderá admitir-se a existência de 5% de perda de eficácia na aplicação do pré-esforço por deformação instantânea do betão, contudo, sendo a aplicação do pré-esforço a solicitação mais gravosa para o elemento pré-fabricado, considerou-se, para efeitos de modelação numérica, que a pré-tensão era mobilizada na sua totalidade. A tensão prevista nos cordões de pré-esforço é de 1395 MPa.

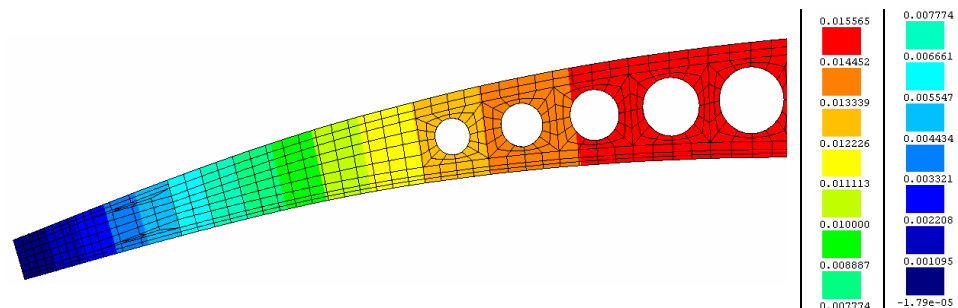
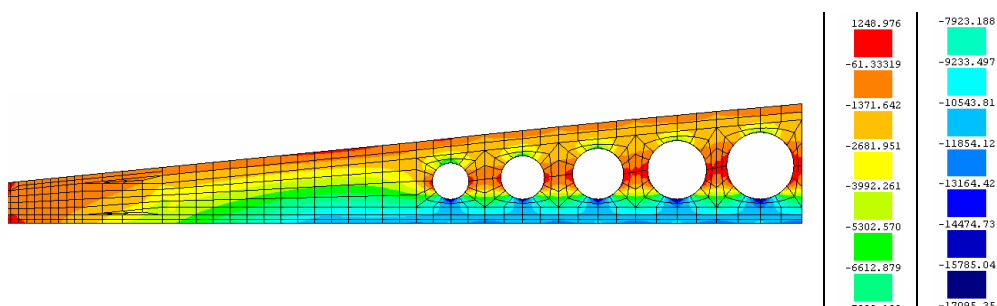


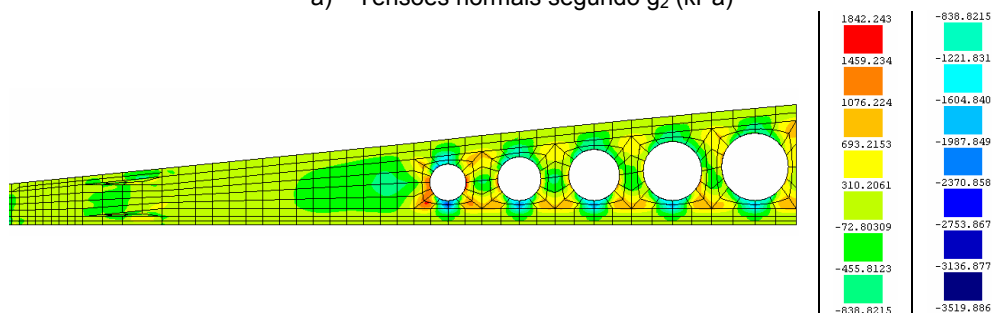
Figura 4 - Deslocamentos segundo  $g_3$  (m).

Na Figura 4 apresenta-se a deformada esperada após a mobilização da pré-tensão e peso próprio. Nesta condição de carregamento a contra-flecha esperada é de 15.6 mm

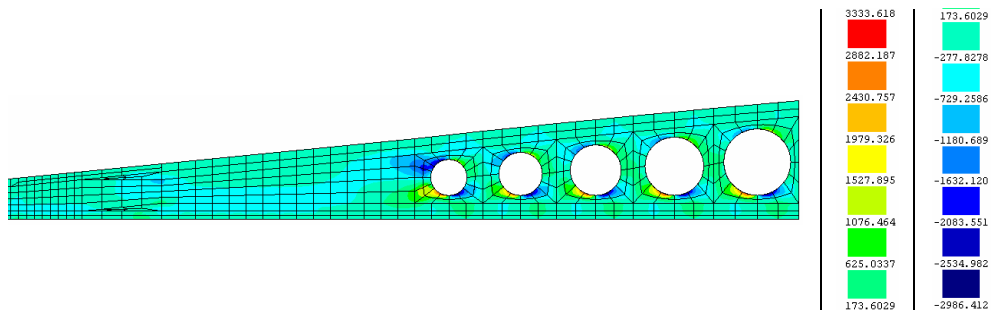
Na Figura 5 estão representados os campos de tensões obtidos após a mobilização da pré-tensão e do peso próprio em simultâneo. Na Figura 6 ilustra-se o padrão de fendilhação previsto para este carregamento. A existência de fendilhação nas zonas dos aligeiramentos sugere a necessidade de se aplicar armadura ordinária no contorno dos mesmos [9-10].



a) Tensões normais segundo  $g_2$  (kPa)



b) Tensões normais segundo  $g_3$  (kPa)



c) Tensões tangenciais segundo  $\tau_{23}$  (kPa)

Figura 5 - Tensões normais e tangenciais (kPa) – Fase de Fabrico.

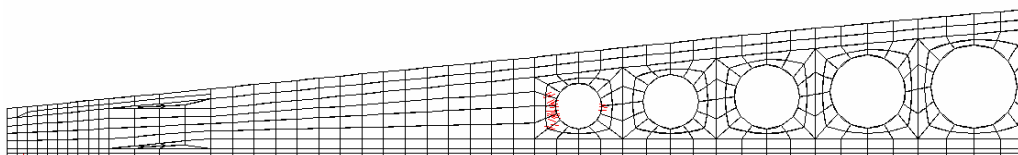
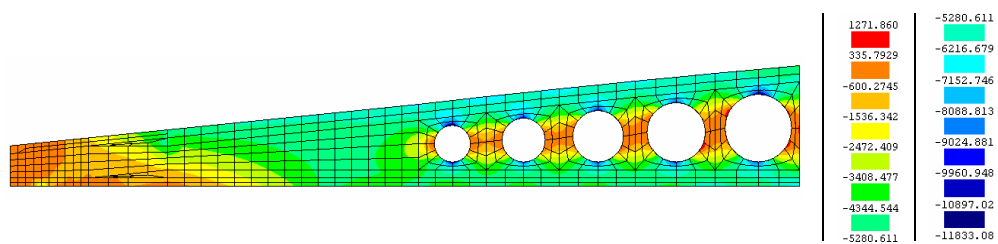


Figura 6 – Padrão de fendilhação – Fase de Fabrico.

## 6.2. Serviço

Na presente secção apresentam-se os resultados obtidos através da simulação das condições de carregamento em serviço. As propriedades admitidas são as apresentadas Quadro 1 para os 28 dias. Na fase de serviço, prevê-se a existência de 20% de perda de pré-tensão, por deformação instantânea e por deformação a longo prazo. A tensão prevista nos cordões de pré-esforço é de 1167 MPa.

Na Figura 7 estão representados os campos de tensões registados.



a) Tensões normais segundo  $g_2$  (kPa)

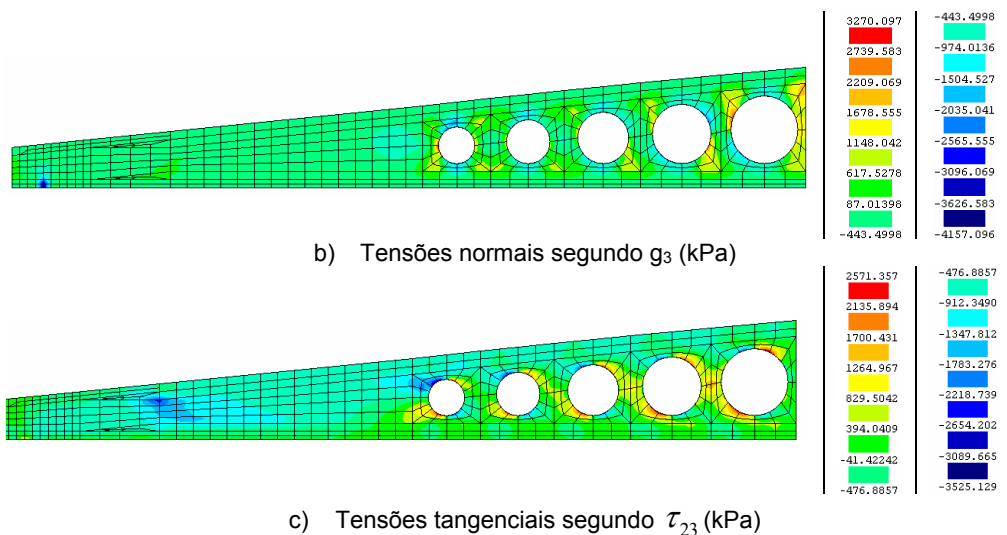


Figura 7 - Tensões normais e tangenciais – Fase de Serviço.

Na Figura 8 apresenta-se a deformada esperada após a mobilização do peso próprio da viga, madres, chapas e ligações, bem como da sobrecarga. Na Figura 9 apresenta-se o padrão de fendilhação desenvolvido para este carregamento.

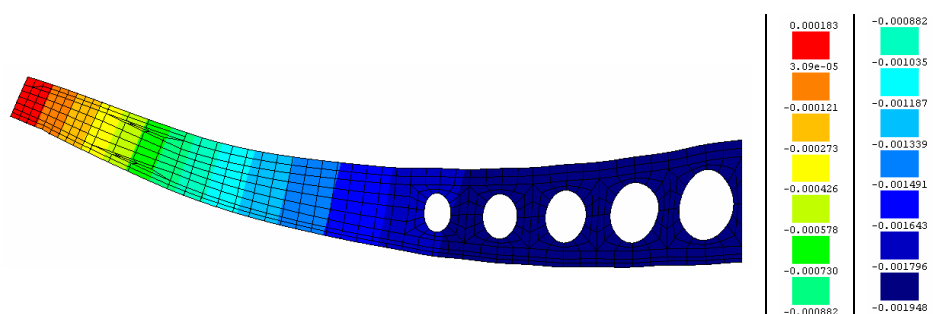


Figura 8 - Deslocamentos segundo  $g_3$  (m).

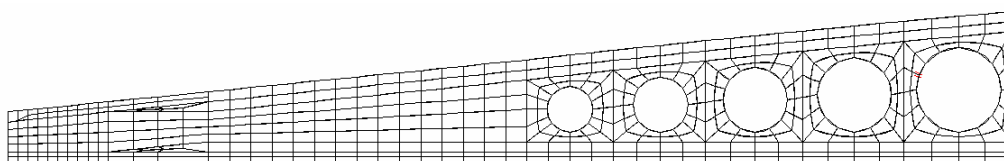


Figura 9 - Padrão de Fendilhação - Fase de Serviço.

Na Figura 10 apresenta-se a curva deslocamento vertical a meio vão versus reacção vertical no apoio.

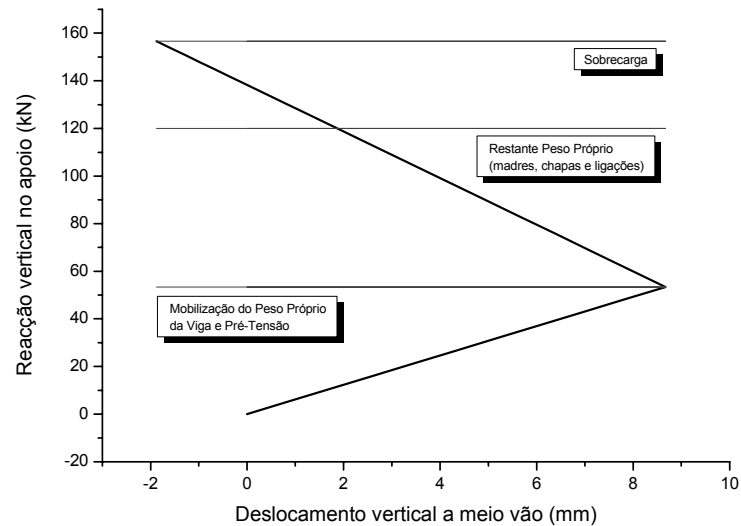


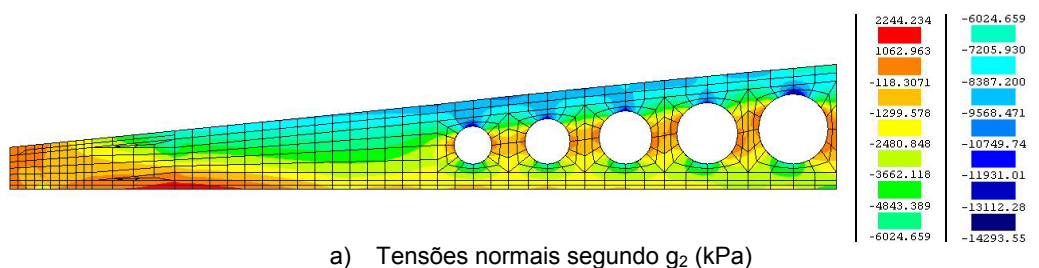
Figura 10 – Variação do deslocamento vertical a meio vão com a mobilização das solicitações previstas.

Os deslocamentos verticais a meio vão previstos são de 1.83 mm (flecha instantânea) e 5.49 mm (flecha a longo prazo).

### 6.3. Estado Limite Último

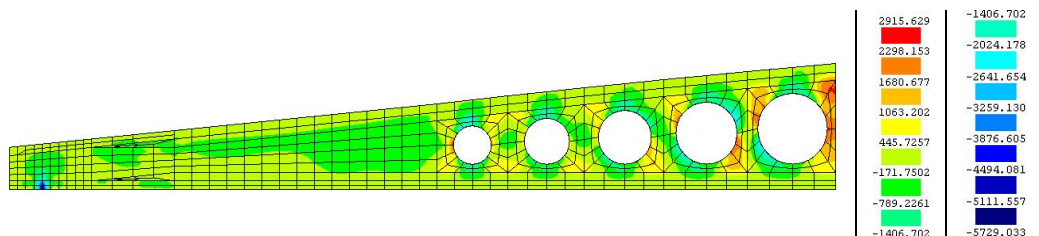
Na presente secção apresentam-se os resultados obtidos através da simulação das condições de carregamento em Estado Limite Último. Nesta fase as acções peso próprio, peso das chapas e ligações foram afectadas por um coeficiente de segurança de 1.35, relativamente à sobrecarga, o coeficiente considerado foi de 1.50. Nesta fase, as propriedades materiais  $f_{ck}$  e  $f_{ctk,min}$  foram afectadas por um coeficiente parcial de segurança de 1.25 [11]. As características adoptadas para a pré-tensão são idênticas às referidas no caso de carga Serviço.

As Figuras 11 a 13 apresentam, respectivamente, os campos de tensões, a deformada e o padrão de fendilhação para as cargas previstas nesta fase.

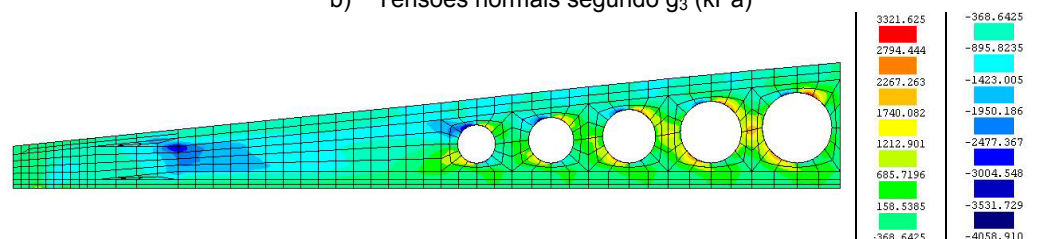


a) Tensões normais segundo  $g_2$  (kPa)





b) Tensões normais segundo  $g_3$  (kPa)



c) Tensões tangenciais segundo  $\tau_{23}$  (kPa)

Figura 11 - Tensões normais e tangenciais – ELU.

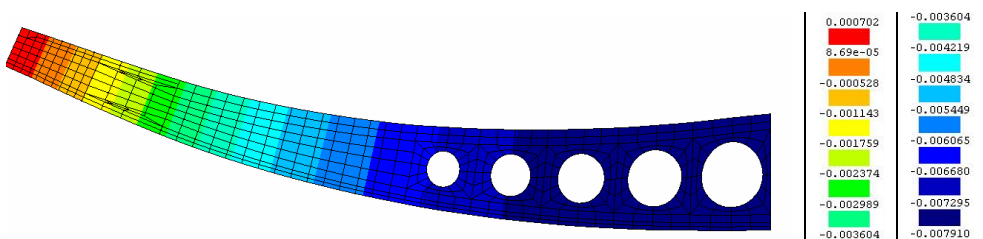


Figura 12 - Deslocamentos segundo  $g_3$  (m)

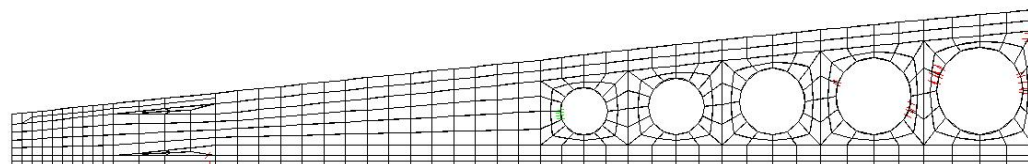


Figura 13 - Padrão de Fendilhação – ELU.

#### 6.4. Previsão da carga última para a VMC20.

Ao carregamento definido para Estado Limite Último foi adicionado, faseadamente, uma carga complementar com o objectivo de simular a rotura da VMC20. Deste modo pretende-se definir qual a carga de rotura da solução em estudo.

Na Figura 14 apresenta-se a curva deslocamento vertical a meio vão versus reacção vertical no apoio, e os valores da reacção vertical (linhas horizontais) para as solicitações referidas.

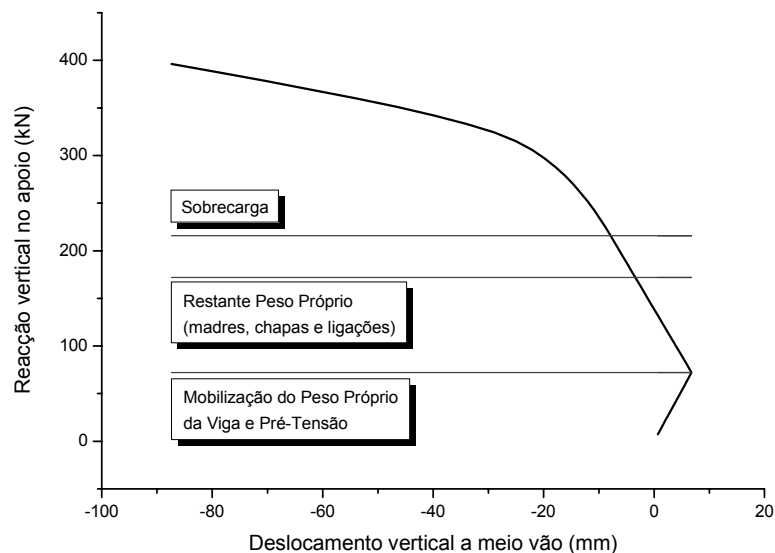


Figura 14 – Variação do deslocamento vertical a meio vão.

Os resultados obtidos sugerem que esta solução estrutural poderá ser solicitada com uma sobrecarga adicional de até 2kN/m, mantendo-se no ramo linear da curva que descreve o seu comportamento perante acções verticais. Na Figura 15 apresenta-se o padrão de fendilhação esperado para a carga que levará o elemento prefabricado à rotura.

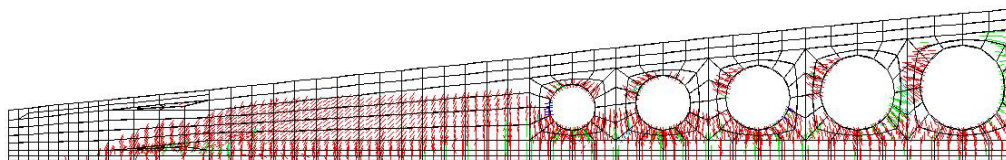


Figura 15 - Padrão de Fendilhação - Previsão de carga última (a vermelho: fendas em processo de abertura; a verde: fendas em processo de fecho; a azul: fendas em reabertura).

## 6.5. Quadro síntese

No Quadro 4 apresentam-se, em síntese, as tensões máximas e mínimas obtidas segundo as duas direcções consideradas. A abertura máxima de fenda, para cada caso de carga considerado, apresenta-se no

Quadro 5, bem como a abertura máxima admissível para estado limite de utilização (serviço).

Quadro 4 – Quadro Resumo.

$\sigma_2$ (MPa)		$\sigma_3$ (MPa)		$\tau_{23}$ (MPa)
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	

Fabrico	-17.10	1.25	-3.52	1.84	-2.99 a 3.33
Serviço	-11.83	1.271	-4.16	3.27	-3.53 a 2.57
ELU	-14.30	2.24	-5.73	2.92	-4.06 a 3.32

Quadro 5 - Abertura de fendas.		
Largura de fenda (mm)		
	Prevista	Admissível
Fabrico	0.007	Armadura Pré-esforço W=0.1 mm
Serviço	0.001	Armadura Ordinária W=0.2 mm
ELU	0.01	

## 7. LIGAÇÃO VIGA-PILAR

A ligação entre a VMC20 e o pilar é conseguida por intermédio de dois varões roscados de 25 mm de diâmetro (ver Figura 16).

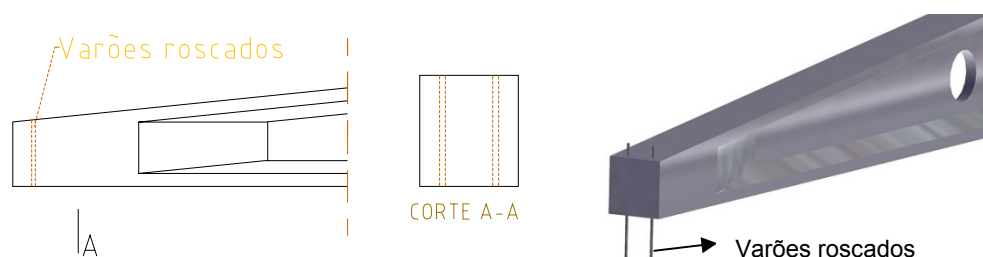


Figura 16- Mecanismo de ligação Viga-Pilar.

A avaliação do comportamento da ligação referida foi efectuada recorrendo, da mesma forma, ao método dos elementos finitos. Esta análise permitiu avaliar o efeito do tipo de ligação utilizado entre os elementos estruturais, ao nível do comportamento da viga e dos pilares. Deste modo, alterando a tipologia da ligação proposta e, conseqüentemente, a rigidez da ligação, foi possível quantificar a influência desta no estado de tensão dos elementos constituintes.

O aumento de rigidez da ligação proporciona, na VMC20, a diminuição das tensões de tracção a meio vão, gerando-se por outro lado, tensões de tracção na zona próxima à ligação.

Na Figura 17 apresenta-se a malha de elementos finitos adoptada para a caracterização do funcionamento do pórtico.

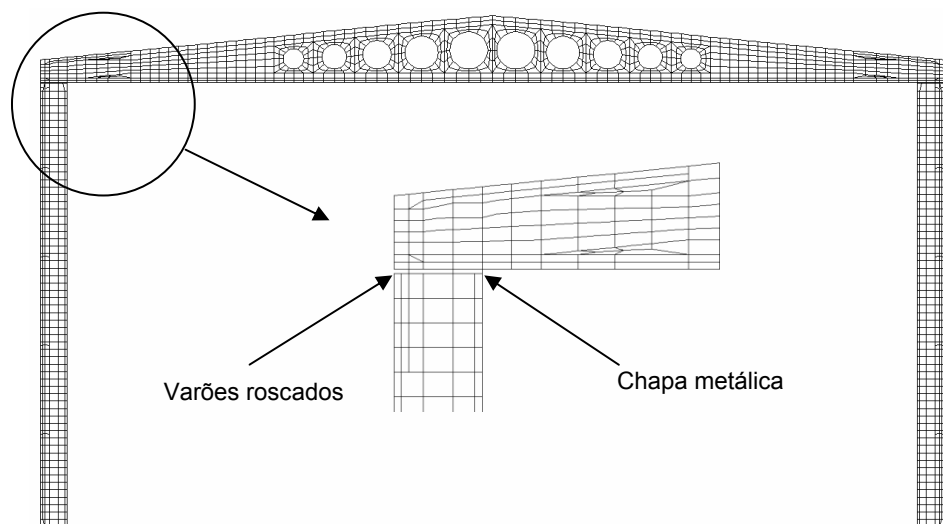


Figura 17 - Pórtico plano (pormenor do apoio).

Para um dos casos de carga utilizados na avaliação da segurança do pórtico, a título exemplificativo, verifica-se que a continuidade promovida pela ligação usada promove a fendilhação do banzo superior na zona do apoio direito (ver Figura 18). A utilização de armadura ordinária torna-se indispensável nestas zonas.

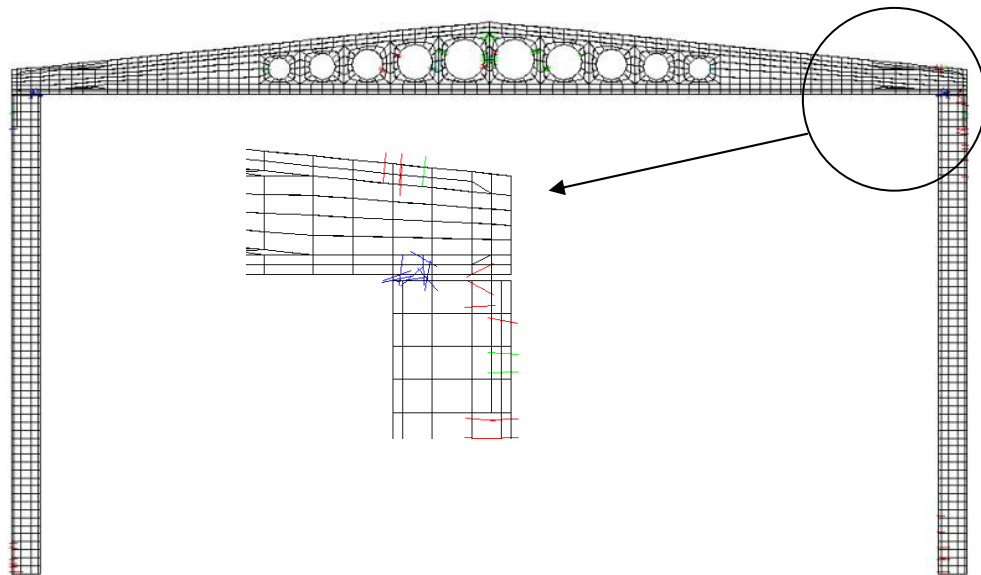


Figura 18 - Padrão de fendilhação (pormenor apoio direito).

## 8. ANÁLISE COMPARATIVA

Com o objectivo de aferir quais as principais vantagens da utilização do BRFA neste tipo de elemento estrutural, tendo como base as armaduras passivas e activas obtidas no dimensionamento atrás descrito, procedeu-se à modelação da VMC20 considerando que esta seria constituída por Betão Simples, BS (classe de resistência C50/60), estando as suas propriedades descritas no Quadro 6.

Quadro 6 – Propriedades do BS (C50/60).

$t$	$E$ (GPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{ctk,min}$ (MPa)	$G_F$ (Nmm/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon_{n,2}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$	$\sigma_{n,2}^{cr} / \sigma_{n,1}^{cr}$	$\varepsilon_{n,3}^{cr} / \varepsilon_{n,u}^{cr}$	$\sigma_{n,3}^{cr} / \sigma_{n,1}^{cr}$
28dias	39.0	50.0	2.90	0.1	0.05	0.60	0.20	0.20

Aplicado um carregamento similar, a viga apresenta uma rotura localizada perto do maior aligeiramento circular, apresentando fendas com cerca de 0,5mm de espessura para uma reacção no apoio de 205kN, valor abaixo da carga definida para Estado Limite Último. Na Figura 19 apresentam-se a deformada e padrão de fendilhação para a zona referida, as fendas a rosa indicam que a fenda se encontra completamente aberta (crack status: fully-open).

Deste modo podemos observar que a introdução de fibras de aço na matriz cimentícia do betão possibilita a optimização da distribuição das tensões ao longo do elemento após microfendilhação, evitando a concentração de esforços e formação de fendas discretas proporcionada pela introdução de aligeiramentos de dimensões consideráveis.

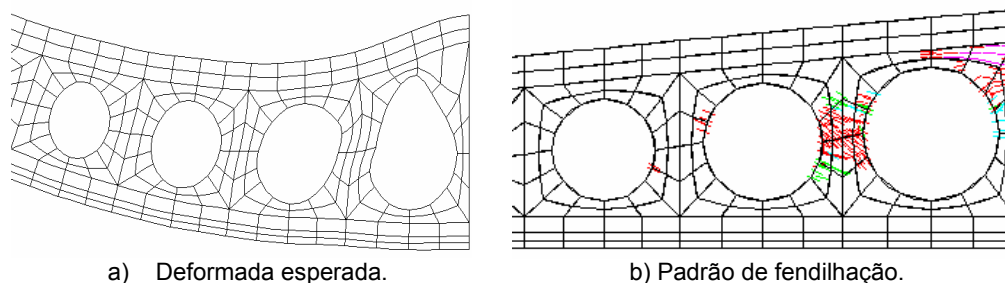


Figura 19 - Resultados obtidos para BS.

## 9. CONCLUSÃO

A investigação realizada centrou-se na concepção, análise e dimensionamento de um elemento pré-fabricado denominado VMC20. A modelação foi efectuada recorrendo a um software de cálculo automático (FEMIX, versão 4.0), baseado no Método dos Elementos Finitos.

O recurso ao MEF permitiu estudar o efeito de introdução de aligeiramentos, variações geométricas, inclusão de armadura convencional, armadura de pré-esforço e fibras de aço

avaliando, de forma pormenorizada, quais os efeitos particulares no comportamento global do elemento pré-fabricado em causa.

Sempre que necessário, recorreu-se à utilização de modelos de análise não linear material por fendilhação. Este modelo de análise sofisticado permitiu ter em conta o processo de iniciação e propagação de fissuras em materiais de matriz cimentícia, e consequentemente, controlar a abertura de fissuras e identificar as zonas críticas em que a utilização de armaduras ordinárias poderá ser necessária. A análise não linear material foi especialmente útil na exploração do potencial de utilização de betão reforçado com fibras em elementos pré-fabricados.

## **10. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a colaboração prestada pelas Empresas Maprel - Empresa de Pavimentos e Materiais Pré-Esforçados e Civitest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil.

## **11. BIBLIOGRAFIA**

- [1] Azevedo, Á. F. (2003). "Método dos Elementos Finitos". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [2] Barros, J. (2000). "Lajes e Cascas segundo o Método dos Elementos Finitos". Universidade do Minho.
- [3] Barros, J.A.O., Pereira, E.N.B., Santos, S.P.F., Lourenço, L.A.P., "Possibilidades e desafios do betão auto-compactável reforçado com fibras – do laboratório à aplicação real", Seminário "Inovação em betões nova normalização de betões especiais", no âmbito da Construnor 2006, Parque de Exposições de Braga, 49-68, 21 Setembro de 2006.
- [4] CEB-FIB (1993). "CEB-FIP Model Code 1990 - Design Code." Thomas Telford, Lausanne, Switzerland.
- [5] Sena Cruz, J. M., "Reforço de estruturas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento". Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 213 pp, 2004.
- [6] EN 1991-1. (2002). Eurocode 1: Actions on structures.
- [7] RSA. (2005). Regulamento de Segurança e Acções Para Estruturas de Edifícios e Pontes. Porto Editora.
- [8] EN 1998-1. (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part

1: General rules, seismic actions and rules for buildings.

- [9] EN 1992-1-1. (2002). Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings.
- [10] REBAP. (2005). Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado. Porto Editora.
- [11] CNR (2006). "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato", Italia.